

**UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS" - FACULTAD TECNOLÓGICA  
 PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA  
 FORMATO DE PROYECTOS DE GRADO**

**Nº DE RADICACIÓN:** \_\_\_\_\_

**INFORMACIÓN EJECUTORES**

**Ejecutor 1**

Nombre (s):	Jaime Alejandro
Apellido (s):	Plazas Perilla
Código:	20172375030
E-mail:	<a href="mailto:jaimealejandroplazas@gmail.com">jaimealejandroplazas@gmail.com</a>
Teléfono fijo:	9059450
Celular:	3057157427



**Ejecutor 2**

Nombre (s):	Johan Eduardo
Apellido (s):	Cruz Vargas
Código:	20172375018
E-mail:	<a href="mailto:jecruzv@correo.udistrital.edu.co">jecruzv@correo.udistrital.edu.co</a>
Teléfono fijo:	7850497
Celular:	3196106867



**INFORMACIÓN DEL PROYECTO**

Título del Proyecto:	DIMENSIONAMIENTO DE TURBINA DE VAPOR PARA SER ADAPTADA AL BANCO DE CICLO RANKINE ORGÁNICO DEL LABORATORIO DE CIENCIAS TÉRMICAS DE LA FACULTAD TECNOLÓGICA DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL	
Duración (estimada):	8 meses	
Tipo de Proyecto: (Marqué con una "x")	Innovación y Desarrollo Tecnológico	<input checked="" type="checkbox"/>
	Prestación y Servicios Tecnológicos	<input type="checkbox"/>
	Otro	<input type="checkbox"/>
Modalidad del Trabajo de Grado:	Monografía	
Línea de Investigación de la Facultad*:		
Línea de Investigación del Proyecto Curricular**:	Diseño Maquinaria Térmica (Energías Alternativas)	
Grupo de Investigación:		
Proyecto de Investigación:		
Áreas del conocimiento que involucra:		

**INFORMACIÓN PASANTÍA**

Nombre de la empresa:	
Dirección:	
Teléfonos:	
Correo electrónico:	
Página Web:	

**INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA**

Director: (Vo. Bo.)	
Proyecto de Pasantía: (Tutor): (Vo. Bo.)	
Formulación Proyecto de Grado: (Profesor): (Vo. Bo.)	

## DIMENSIONAMIENTO DE UNA TURBINA DE VAPOR PARA SER ADAPTADA AL BANCO DE CICLO RANKINE ORGÁNICO DEL LABORATORIO DE CIENCIAS TÉRMICAS DE LA FACULTAD TECNOLÓGICA DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL

### Tabla de contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>4</b>
<b>3. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>5</b>
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>11</b>
4.1. Razones Sociales .....	11
4.2. Razones Económicas .....	11
4.3. Razones Tecnológicas.....	11
<b>5. OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
5.1. Objetivo General.....	12
5.2. Objetivos Específicos.....	12
<b>6. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
6.1. Generación de Potencia Térmica.....	13
6.2. Ciclo Rankine.....	13
6.3. Ciclo Rankine Orgánico .....	14
6.4. Turbomáquinas.....	16
6.5. Turbina de Impulso .....	17
<b>7. METODOLOGÍA</b> .....	<b>20</b>
<b>8. CRONOGRAMA</b> .....	<b>21</b>
<b>9. PRESUPUESTO</b> .....	<b>22</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>23</b>

## 1. INTRODUCCIÓN.

La Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital tiene en su laboratorio de ciencias térmicas un ORC (Ciclo Rankine Orgánico), pero tiene un problema, no cuenta con el dimensionamiento de una turbina, por ello se desea la especificación dimensional de una turbina para el banco ORC del laboratorio de ciencias térmicas de la facultad tecnológica de la universidad distrital.

Para ello se buscará definir los parámetros de entrada de la turbina para iniciar los cálculos, después se seleccionará la turbina que mejor se adecue, luego se optimizará el dimensionamiento geométrico a partir del modelamiento en CAD, finalmente, se elaborarán planos de detalle y constructivos.

Finalmente se espera obtener un resultado económico, sencillo y compatible que satisfaga el ideal funcionamiento del banco ORC.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

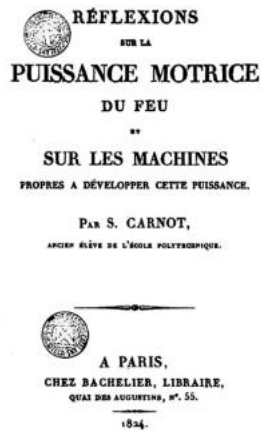
Recientemente en el laboratorio de ciencias térmicas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede Tecnológica se encuentra un banco de laboratorio, el cual es capaz de replicar el ciclo Rankine orgánico utilizando como fluido de trabajo alcohol para la obtención de energía eléctrica. Fue construido por estudiantes de ingeniería mecánica con la finalidad de investigar más sobre este método y desarrollar esta tecnología en la universidad. Dicho banco de laboratorio presenta una problemática, la falta de especificación dimensional de la turbina en el banco de laboratorio ORC para su ideal funcionamiento, es por ello que se plantea los siguientes interrogantes ¿Se podrá especificar dimensiones de una turbina que se adapte a las especificaciones del banco de laboratorio ORC?, ¿Podría esta geometría llegar a utilizar otro fluido de trabajo diferente al actual (alcohol)? y ¿Cómo se verían afectados los parámetros de entrada con este nuevo fluido?

### 3. ESTADO DEL ARTE

El hombre en su eterna búsqueda de alcanzar un mayor poder sobre su entorno ha sido capaz de crear, de pensar y de cuestionar, y este es el punto de partida en la que una pequeña idea genera toda una evolución tecnológica, que a su vez también produce una evolución de la humanidad, a continuación, se encontrara como el CICLO RANKINE ORGANICO (ORC) avanzó a través del tiempo.

El origen del ciclo Rankine Orgánico surge de la propuesta hecha por Sadi Carnot la cual consistía en poder utilizar otros fluidos de trabajo diferentes al vapor de agua como lo menciona L.Y.BRONICKI en el artículo llamado HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS “En su tratado (ver Figura 1), publicado en 1824, Sadi Carnot ya sugirió usar otras sustancias como sustitutos del agua. Reconoció varias direcciones prometedoras en el Sistemas de energía orgánicos del ciclo de Rankine (ORC).”<sup>1</sup>

Figura 1. Tratado de Carnot



History of Organic Rankine Cycle systems , artículo científico - ORMAT co-founder. Publicado el 2 September 2016 . pag disponible en sitio web : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005101000028>

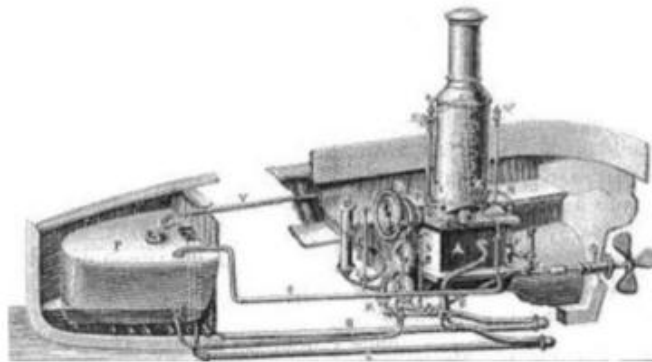
Pero en ese momento histórico el ciclo Rankine organico no era el protagonista principal en el escenario energético , así que Carnot no expande ese conocimiento , pues sabe que no es la prioridad como lo indica L.Y.BRONICKI en el artículo llamado HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS “Carnot tenía muy poco que enseñar a los ingenieros de su tiempo; la superioridad de la máquina de vapor de condensación a alta presión había sido establecida, también tenían las ventajas de una operación expansiva, y hacia 1824 los

<sup>1</sup>L.Y.BRONICKI , “HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS” , artículo científico - ORMAT co-founder. Publicado el 2 September 2016 . pag disponible en sitio web : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005101000028>

*ingenieros sabían bien lo suficiente como para que, considerando todos los aspectos, no hubiera mejor sustancia de trabajo que el vapor.”<sup>2</sup>*

Pero en 1888 Frank W. Ofeldt retoma el concepto de fluido de trabajo diferente para el ciclo Rankine hizo las primeras practicas conocidas del ORC , además la legislación le exigía declarar la cantidad de vapor utilizado , mientras que con otros fluidos no como lo dice la empresa KAYMACOR en su reseña HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC *“Hacia el final del siglo XIX, algunas pequeñas embarcaciones fueron fabricadas con motores que usaban gasolina hirviendo (ver Figura 2) en lugar de vapor para el sistema de energía. Los más conocidos de estos fueron los construidos por Frank W. Ofeldt (los "lanzamientos de nafta"), que entraron en producción a partir de 1897. El fluido de trabajo para el motor era nafta”<sup>3</sup>*

Figura 2. Embarcacion con fluido de trabajo



KAYMACOR , Historia del ciclo orgánico de Rankine de ORC – pagina institucional KAYMACOR sistemas micro ORC. Disponible en sitio web : <https://www.kaymacor.com/en/Rankine-cycle/>

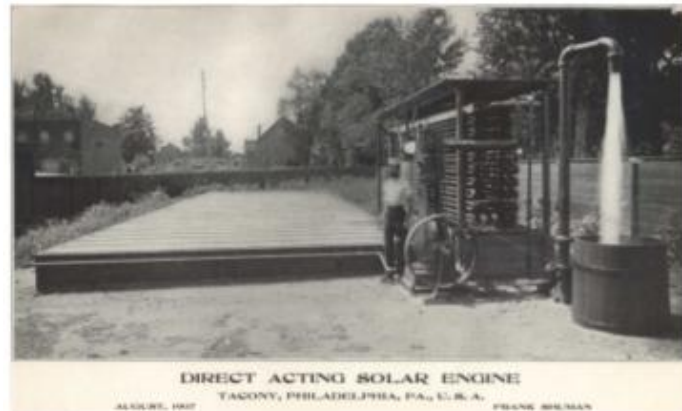
En sus inicios la mayoría de fuentes de energía para calentar el fluido provenían del sol , y así Willsie construye un motor solar avanzado para su época (ver Figura 3) como lo cita L.Y.BRONICKI en el artículo llamado HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS *“Durante medio siglo hubo pocas aplicaciones de ORC, todas usan energía solar en vez que los combustibles fósiles. En 1904 Willsie construyó dos motores solares ORC utilizando dióxido de azufre. Uno fue una instalación de 6 caballos de fuerza (4.5 kW) en St. Louis, Missouri, y la otra un sistema de caballos de fuerza (11 kW) en Needles, California. En 1907 F. Shuman, construyó un Motor solar ORC, utilizando un colector solar plano de 110 m<sup>2</sup> para hervir el éter a temperaturas alrededor 80 C y maneja un motor de 3.5 HP (2.6 kW).”<sup>4</sup>*

<sup>2</sup> L.Y.BRONICKI , “HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS” , artículo científico - ORMAT co-founder. Publicado el 2 September 2016 . pag disponible en sitio web : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005101000028>

<sup>3</sup>KAYMACOR , “HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC “ – pagina institucional KAYMACOR sistemas micro ORC. Disponible en sitio web : <https://www.kaymacor.com/en/Rankine-cycle/>

<sup>4</sup> L.Y.BRONICKI , “HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS” , artículo científico - ORMAT co-founder. Publicado el 2 September 2016 . pag disponible en sitio web : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005101000028>

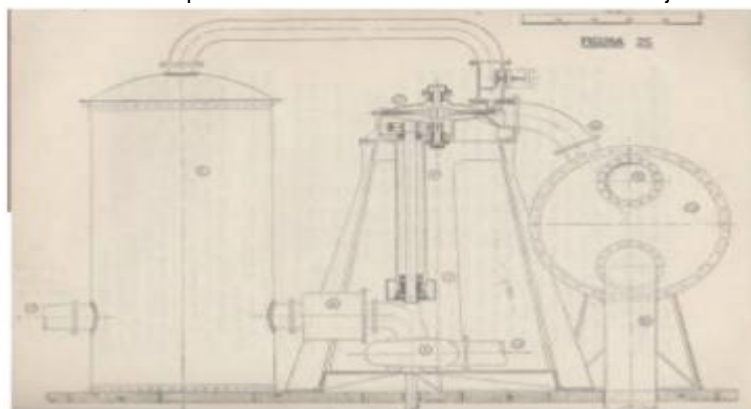
Figura 3. Colector solar para calentamiento de eter



KAYMACOR , Historia del ciclo orgánico de Rankine de ORC – pagina institucional KAYMACOR sistemas micro ORC. Disponible en sitio web : <https://www.kaymacor.com/en/Rankine-cycle/>

La tecnología ORC siguió avanzando y trabajando con diferentes fluidos, desde Tito Romagnoli, hasta Luigi Dámelia con lo dice la empresa KAYMACOR en su reseña HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC “*Tito Romagnoli, un italiano, desarrolló varios motores Rankine entre 1923 y 1930: uno, alrededor de 2 CV (aproximadamente 1: 5 kW), con cloruro de metilo como fluido de trabajo. El profesor Luigi D'Amelio (1893-1967), presidente de maquinaria térmica e hidráulica de la Universidad de Nápoles, diseñó una planta de energía solar para riego basada en un motor de ORC (ver Figura 4) que usa monocloroetano como fluido de trabajo [Uso de vapores de alto peso molecular en pequeñas turbinas y utilización del calor solar como fuente de energía motriz]. Dicha planta solar de ORC se habría utilizado para bombear agua en las zonas áridas del norte de África.*”<sup>5</sup>

Figura 4. Planta de energía solar para riego basada en un motor de ORC que usa monocloroetano como fluido de trabajo

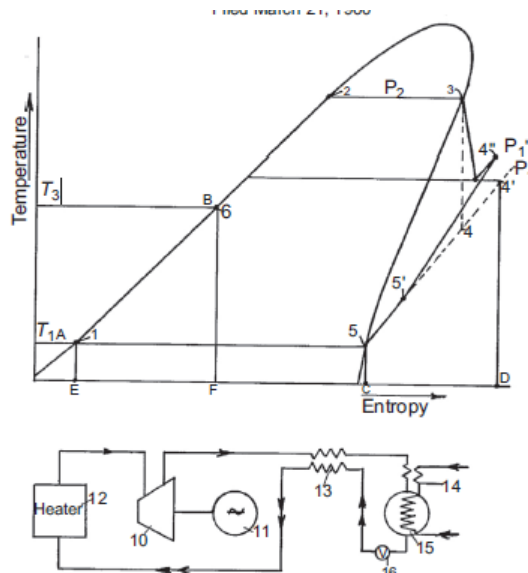


KAYMACOR , Historia del ciclo orgánico de Rankine de ORC – pagina institucional KAYMACOR sistemas micro ORC. Disponible en sitio web : <https://www.kaymacor.com/en/Rankine-cycle/>

<sup>5</sup>KAYMACOR , “HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC “ – pagina institucional KAYMACOR sistemas micro ORC. Disponible en sitio web : <https://www.kaymacor.com/en/Rankine-cycle/>

Entre 1958 y 1961 se crea en Israel el National Physical Laboratory of Israel que permitió profundizar la investigación y los estudios del ORC, lo cual permitió mejorar el ciclo como lo menciona L.Y.BRONICKI en el artículo llamado HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS “Se introdujo un nuevo ciclo de Rankine (Tabor y Bronicki, 1961), utilizando un recuperador, que mejoró la eficiencia del ciclo en tal manera que el resultado es en gran medida independiente del fluido utilizado, además de “corregir” (ver Figura 5) la forma del diagrama T-S. La retroalimentación del recuperador también recupera parte de la pérdida de calor internas. Después de la consideración de D’Amelio de la masa molecular (además de la presión de vapor) Tabor y el inmigrante francés Lucien Bronicki desarrollaron una pequeña unidad de energía solar, una turbina de ciclo orgánico Rankine, para países en desarrollo con redes eléctricas problemáticas”<sup>6</sup>

Figura 5. Recuperación en ORC



History of Organic Rankine Cycle systems, artículo científico - ORMAT co-founder. Publicado el 2 September 2016. pag disponible en sitio web : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005101000028>

Se realiza en Phoenix, Arizona la primera feria mundial de energía solar (ver Figura 6) en la cual se presentaron nuevas tecnologías, entre ellas el ORC como lo menciona la empresa KAYMACOR en su reseña HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC “Daniele Gasperini (1895-1960) diseñó y construyó una bomba solar para elevar el agua desde el subsuelo, llamada SOMOR, después del nombre de la empresa que la construyó (Societ Motori Recupero-Compañía de motores de recuperación) para calor solar y calor residual, expuesta en la primera feria mundial de energía solar, celebrada en Phoenix, Arizona, en 1955”<sup>7</sup>

<sup>6</sup> L.Y.BRONICKI, “HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS”, artículo científico - ORMAT co-founder. Publicado el 2 September 2016. pag disponible en sitio web : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005101000028>

<sup>7</sup> KAYMACOR, “HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC” – pagina institucional KAYMACOR sistemas micro ORC. Disponible en sitio web : <https://www.kaymacor.com/en/Rankine-cycle/>



Figura 6. Primera feria mundial de energía solar



KAYMACOR , Historia del ciclo orgánico de Rankine de ORC – pagina institucional KAYMACOR sistemas micro ORC. Disponible en sitio web : <https://www.kaymacor.com/en/Rankine-cycle/>

En Europa el país que empieza a sobresalir y a investigar más acerca de ORC es Italia , allí se crea el Politécnico di Milano que se especializa en la investigación de la tecnología ORC como menciona L.Y.BRONICKI en el artículo llamado HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS *“La actividad italiana en el campo de las ORC comenzó en la década de 1970 en el Politécnico di Milano, bajo la guía científica del Prof. G. Angelino (1984). Dirigió un equipo de científicos, incluyendo a Ennio Macchi y Mario Gaia, estudiando la posibilidad de usar fluidos en lugar de agua para alimentar el ciclo Rankine, inicialmente para automoción, espacio, y aplicaciones solares.”*<sup>8</sup>

En 1967 en la URSS se realiza EL PRIMER CICLO BINARIO GEOTÉRMICO, así lo menciona la empresa KAYMACOR en su reseña HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC *“en 1967 se realiza El primer ciclo binario geotérmico se instaló en la Unión Soviética en la península de Kamchatka. El fluido de trabajo era el refrigerante 1211 y el motor tenía una potencia bruta de 680 kW. La fuente de calor era agua geotérmica a baja temperatura 80”*<sup>9</sup>

En los años 80 en Finlandia se realiza en la escuela finish una avance aplicado a los generadores, turbinas y bombas que actúan en este ciclo como lo reconoce la empresa KAYMACOR en su reseña HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC *“En Finlandia, el Prof. J. Larjola dirigió el desarrollo de turbogeneradores herméticos de alta velocidad en el rango de cientos de kWE, en el que la turbina, el generador y la bomba*

<sup>8</sup> L.Y.BRONICKI , “HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS” , artículo científico - ORMAT co-founder. Publicado el 2 September 2016 . pag disponible en sitio web : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005101000028>

<sup>9</sup> KAYMACOR , “HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC “ – pagina institucional KAYMACOR sistemas micro ORC. Disponible en sitio web : <https://www.kaymacor.com/en/Rankine-cycle/>

*comparten el mismo eje. Una de las primeras aplicaciones de este tipo de turbogenerador ORC fue el uso como el cargador de las baterías de un sumergible deep-see (1987)”<sup>10</sup>*

En el final de los 90 y los inicios del siglo XXI los ciclos Rankine orgánicos siguen expandiendo por todo el mundo, más que todo en nuevas formas de generación de energía como lo menciona la empresa KAYMACOR en su reseña HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC “*el uso de ORC se está expandiendo rápidamente y la tecnología básica es bien conocida. Las aplicaciones más comunes han sido en los sectores de biomasa y geotermia, mientras que el mayor margen de crecimiento se pronostica en los campos de la recuperación de calor y la termodinámica solar (también, en principio, en las plantas de OTEC). Solo en Europa, ahora hay alrededor de 200-230 plantas que funcionan con motores de fluidos orgánicos: 80 en Alemania, alrededor de 70 en Italia y 30 en Austria.*”<sup>11</sup>

A épocas actuales la tecnología ORC puede ser una gran oportunidad de negocio haciendo sostenible la generación de energía como lo dice L.Y.BRONICKI en el artículo llamado HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS “*A partir de 2015, solo dos empresas habían logrado comercializar la tecnología ORC de manera sostenible durante muchas décadas, Ormat y Turboden, mientras que una tercera empresa, Es probable que Exergy, sobre la base de instalaciones recientes, se una a ellos. Mientras que El mercado ORC sigue siendo un nicho de mercado, brinda una oportunidad de negocios sostenibles, especialmente para las compañías de juego puro que tienen la perseverancia y la técnica cultura de la innovación para perseguir el mercado.*”<sup>12</sup>

---

<sup>10</sup> KAYMACOR , “HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC “ – pagina institucional KAYMACOR sistemas micro ORC. Disponible en sitio web : <https://www.kaymacor.com/en/rankine-cycle/>

<sup>11</sup> KAYMACOR , “HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC “ – pagina institucional KAYMACOR sistemas micro ORC. Disponible en sitio web : <https://www.kaymacor.com/en/rankine-cycle/>

<sup>12</sup> L.Y.BRONICKI , “HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS” , articulo científico - ORMAT co-founder. Publicado el 2 September 2016 . pag disponible en sitio web : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005101000028>

## 4. JUSTIFICACIÓN

### 4.1. RAZONES SOCIALES

Expandir el conocimiento:

- Los planos de la turbina para el ORC del laboratorio quedaran disponibles para que todos puedan verlos, y de esa manera ellos podrían seguir con el proyecto o guiarse para hacer otro similar.

### 4.2. RAZONES TECNOLÓGICAS

Aportar planos constructivos para su posterior fabricación y así completar el banco del Ciclo Rankine Orgánico del laboratorio

- Vale la pena reconocer que el banco de trabajo del ciclo Rankine es un logro de todos los estudiantes, pero que aún no está completo y por ello es preciso colaborar con el dimensionamiento (planos de fabricación, ensambles y montajes).

Favorecimiento de mejoras y perfeccionamiento del sistema:

- Todo sistema es susceptible a cambios, mejoras y arreglos, de manera que la continua interacción con el proyecto (equipos, sistema, procesos, materiales, distribución, planeación, etc.) les dará la oportunidad a los estudiantes de mejorar y perfeccionar el proyecto.

Aprender acerca de turbinas y el ORC

- A medida que el proyecto tome forma y comience a andar por sí solo, tal vez aparecerán algunos inconvenientes, dudas, fallas, o mejoras, y es allí donde se aprenderá más y el proceso de conocimiento de la tecnología ORC y las turbinas crecerá.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1. OBJETIVO GENERAL

Especificar dimensionalmente una turbina de vapor que se pueda adaptar al banco de ORC que opera con alcohol como fluido de trabajo, ubicado en el laboratorio de ciencias térmicas de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

### 5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los parámetros de entrada de la turbina mediante el diagnóstico del banco de laboratorio del ciclo Rankine orgánico del laboratorio de ciencias térmicas.
- Seleccionar el tipo de turbina que mejor se adecue al banco a través de los criterios calculados.
- Optimizar el dimensionamiento geométrico de la turbina a partir del modelamiento.
- Elaborar planos de detalle y construcción del modelo.
- Evaluar la potencia generada del modelo dimensionado de la turbina para 3 tipos de fluidos orgánicos variando los parámetros de entrada mediante el uso de herramientas de cálculo.

## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1. GENERACIÓN DE POTENCIA TÉRMICA

Existen varias tecnologías para la generación de potencia, gran parte de estas involucran innumerables aplicaciones de la rama de la física denominada termodinámica. La potencia puede generarse para la propulsión de automóviles, aviones y barcos, así como también el suministro de potencia eléctrica para darle energía a diferentes dispositivos y maquinarias. En general en las ciencias térmicas se pueden clasificar dos diferentes clases de sistemas de generación de potencia, uno es la generación de potencia de gas y el otro en generación de potencia de vapor.

Dentro de los sistemas de potencia de gas se incluyen tecnologías como las mismas turbinas de gas y los motores de combustión interna, ambas tecnologías con la característica que usan una sustancia de trabajo que nunca cambian de fase, mientras dentro de un sistema de vapor, solo se incluyen las tecnologías que hacen uso de una turbina de vapor para la generación de potencia, contando con la característica que su sustancia de trabajo cambia de fase, este cambio permite que se almacene más energía en la sustancia que la que se puede llegar a almacenar por solo un calentamiento, también permite que muy poco del trabajo de expansión se use para el proceso de compresión, ya que al tener un cambio de estado su volumen específico será muy pequeño.

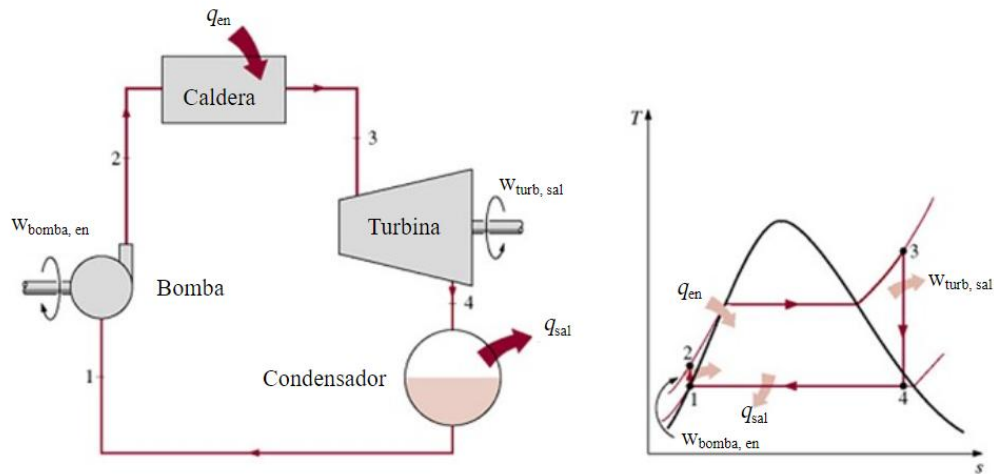
### 6.2. CICLO RANKINE

Como se había mencionado anteriormente las turbinas de vapor son máquinas térmicas que funcionan bajo el sistema de potencia de vapor, actualmente las plantas de potencia por vapor representan la fracción principal en la generación de energía a nivel mundial, esto se debe al hecho de que la razón de trabajo consumido por el sistema es menor a la de una turbina de gas.

El Ciclo apropiado para una central de vapor es el ciclo Rankine, el cual elimina muchos aspectos imprácticos asociados al ciclo de Carnot (ciclo ideal), este nuevo ciclo no incluye ninguna irreversibilidad interna y en su forma más básica se compone de los siguientes procesos.

- 1-2 Compresión isotrópica en una bomba
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera
- 3-4 Expansión isotrópica en una turbina
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador

Figura. 8. Esquema y Diagrama T-S Ciclo Rankine



Yunus A. Çengel, Michael A. Boles, 2011, *Termodinámica: un enfoque de ingeniería*, McGraw-Hill Companies, Inc. séptima Edición

Los cálculos de energía utilizados en la primera ley de termodinámica en un ciclo Rankine son simples, ya que no se realiza trabajo en los dos procesos de transferencia de calor (2-3 y 4-1) y en los procesos donde se involucra trabajo son adiabáticos (3-4 y 1-2), por otro lado, los cambios en la energía cinética y potencial a lo largo de cada componente del ciclo son por lo general despreciables. Obteniendo las siguientes ecuaciones para cada uno de los procesos.

$$q_{En\ 2-3} = h_3 - h_2 \text{ donde } (p_2 = p_3)$$

$$W_{Sal\ 3-4} = h_3 - h_4 \text{ donde } (S_3 = S_4)$$

$$q_{Sal\ 4-1} = h_1 - h_4 \text{ donde } (p_1 = p_4)$$

$$W_{En\ 1-2} = h_2 - h_1 \text{ donde } (S_1 = S_2)$$

La eficiencia térmica del ciclo es:

$$\eta = \frac{W}{q_{En\ 2-3}} = \frac{W_{Sal\ 3-4} - W_{En\ 1-2}}{q_{En\ 2-3}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)}$$

Y su Potencia:

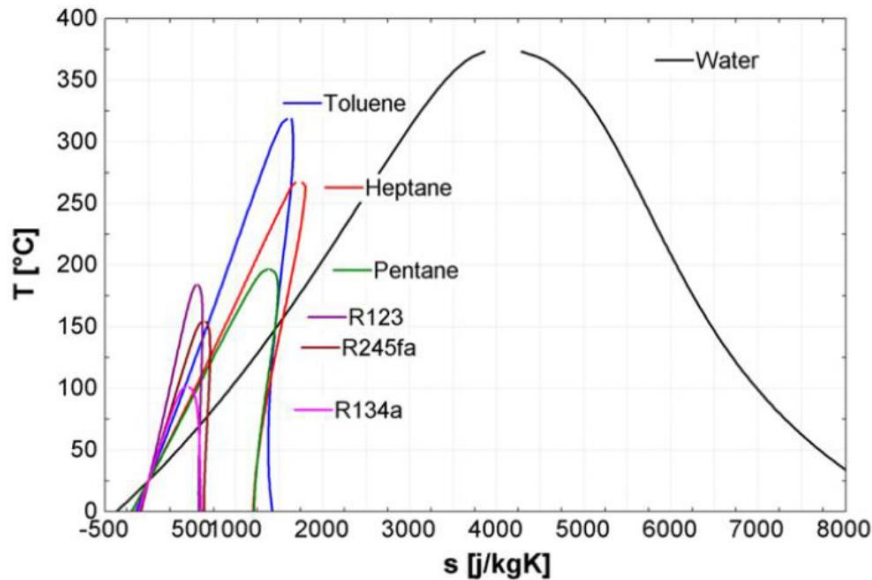
$$Potencia = \dot{m} * W_{Sal\ 3-4}$$

### 6.3. CICLO RANKINE ORGÁNICO

El ciclo Rankine Orgánico habitualmente denominado ORC por sus siglas en inglés (Organic Rankine Cycles) es una de las derivaciones del ciclo Rankine convencional, su diferencia radica en el uso de una sustancia orgánica como fluido de trabajo, por lo general estos fluidos tienen propiedades termodinámicas críticas inferiores a las del agua, por lo que consiguen adaptarse mejor a fuentes de baja temperatura y por lo tanto tienen la posibilidad de generar energía con estas condiciones.

Al manejar diferentes fluidos el ciclo ORC presenta una diferencia notable con el ciclo convencional en la tabla  $T$ - $S$  como se ilustra en la siguiente figura.

Figura 10. Diagrama  $T$ - $S$  de agua y varios Fluidos Orgánicos



B. Tchanche, G. Lambrinos, A. Frangoundakis y G. Papadakis, 2011, "Low-Grade heat conversion into power using organic Rankine cycles- A review of various applications.", *Renewable and Sustaitable Energy Reviews*. Vol. 15

Del anterior grafico se puede extraer varias ventajas y desventajas del uso de fluidos orgánicos.

- A diferencia del agua no son tan buenos portadores de energía, ya que sus calores específicos no son tan altos.
- Pueden llegar a ser tóxicos e inflamables.
- Pueden tener riegos de descomponerse a lo largo del tiempo.
- Su viscosidad puede llegar a ser alta en estado líquido, lo que supone un mayor trabajo en la etapa de bombeo del sistema.
- Su disponibilidad no es tan fácil como la del agua.

Por otro lado

- Dado que en el caso del agua la curva de saturación de vapor tiene una pendiente negativa, existe la necesidad de realizar etapas de sobrecalentamiento para evitar la condensación al realizar la expansión, caso que no ocurre con los fluidos orgánicos.
- Adaptabilidad a una variedad de fuentes de calor por sus temperaturas y presiones de trabajo bajas.
- Teniendo una menor diferencia de temperatura entre evaporación y condensación pueden utilizarse turbinas de una solo etapa.
- Por las condiciones de bajas temperaturas se pueden emplear variedad de materiales en la construcción de la turbina.

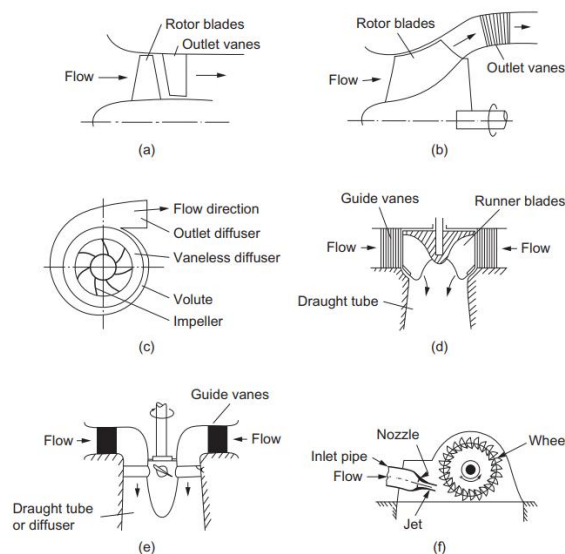
## 6.4. TURBOMÁQUINAS

Las turbomáquinas son todos aquellos dispositivos en los que la energía se transfiere desde o hacia un fluido que fluye por la acción dinámica de una o más filas de alabes móviles. En esencia una hilera de paletas giratorias, un rotor o un impulsor cambian la entalpia de estancamiento del fluido que se mueve a través de ella, generando trabajo positivo o negativo, dependiendo la aplicación de la máquina. Estos cambios de entalpia están íntimamente relacionados con los cambios de presión que ocurren simultáneamente en el fluido.

Se identifican dos categorías principales de turbomáquinas, aquellas que absorben energía para aumentar la presión del fluido y las segundas que producen energía al expandir el fluido a una presión más baja como es el caso de las turbinas de viento, hidráulicas, vapor y gas.

Las turbomáquinas se clasifican de acuerdo con la naturaleza de la ruta de flujo pasante a través de los pasos del rotor. Cuando la trayectoria del flujo es total o mayormente paralela al eje rotacional, el dispositivo se denomina turbomáquinas de flujo axial (Fig. 10. (a) y (e)), cuando la trayectoria del flujo pasante se encuentra total o principalmente en un plano perpendicular al eje de rotación, el dispositivo se denomina turbomáquinas de flujo radial (Fig. 10. (c)), en otro de los casos encontramos las turbomáquinas de flujo mixto las cuales son las más usadas en la industria por su adaptabilidad para recibir componentes de velocidad radial y axial (Fig. 10. (b) y (d)), ya por ultimo tenemos una categoría especial las cuales son las de turbomáquinas de reacción o de impulso según si los cambios de presión están ausentes o presentes (Fig. 10. (f)).

Figura. 10. Ejemplos de Turbomáquinas



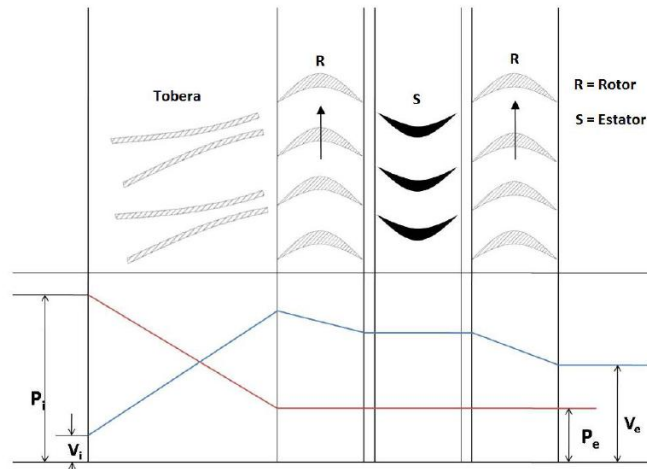
S.L. Dixon, B. Eng., 2014, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, Butterworth-Heinemann seventh edition.



## 6.5. TURBINA DE IMPULSO

Dentro de una turbina de impulso el flujo de energía es acelerado dentro de una tobera convirtiendo la presión en energía cinética, este flujo impacta contra el rotor transfiriendo energía, seguidamente es desviado por los pasajes de los alabes hacia la salida de la etapa. La transferencia de trabajo se realiza mediante un gran cambio de momento angular a través de los alabes. Una característica importante de las turbinas de impulso es que sus componentes de velocidad a la entrada y la salida son iguales y opuestas,  $v_{wi} = -v_{we}$  ya que no hay un incremento en las velocidades tangenciales en los alabes, manteniendo así la presión constante a lo largo de la etapa.

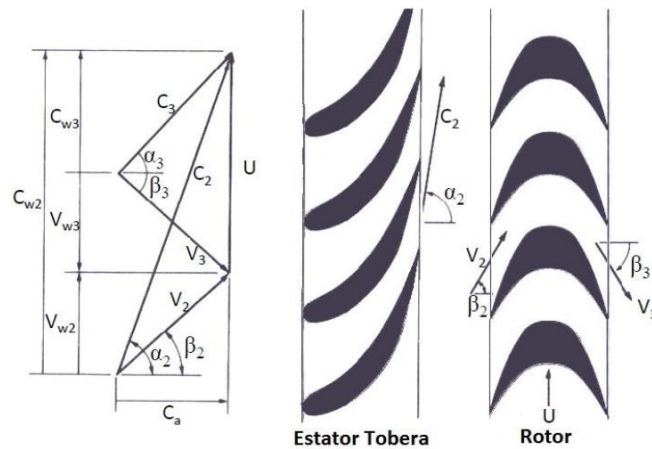
Figura. 11. Caída de presión y variación de velocidad de una turbina de impulso.



Martinez Elihu., 2015, *Diseño Teórico de una turbina axial de una etapa mediante conjuración contra rotativa*, México D.F.

El grado de reacción es un parámetro importante en el diseño de turbinas, al observar el triángulo de velocidades de una turbina de estas, se puede notar la configuración particular para este tipo de turbinas, la cual tiene grado de reacción 1, y a partir de la geometría de los triángulos se pueden deducir ecuaciones que expliquen el comportamiento entonces.

Figura. 12. Triángulo de velocidades de una turbina de impulso.



Martinez Elihu., 2015, *Diseño Teórico de una turbina axial de una etapa mediante conjuración contra rotativa*, México D.F.

Si:  $\beta_3 = -\beta_2$  Entonces  $V_{w3} = V_{w2}$

$$\text{Por Lo tanto, } C_{w2} - C_{w3} = 2V_{w2} = 2(C_{w2} - U) = 2U \left( \frac{C_a}{U} \tan \alpha - 1 \right)$$

La relación de trabajo será:

$$\frac{\Delta h_0}{U^2} = 2U \left( \frac{C_a}{U} \tan \alpha_2 - 1 \right)$$

O en términos del coeficiente de carga por etapa:

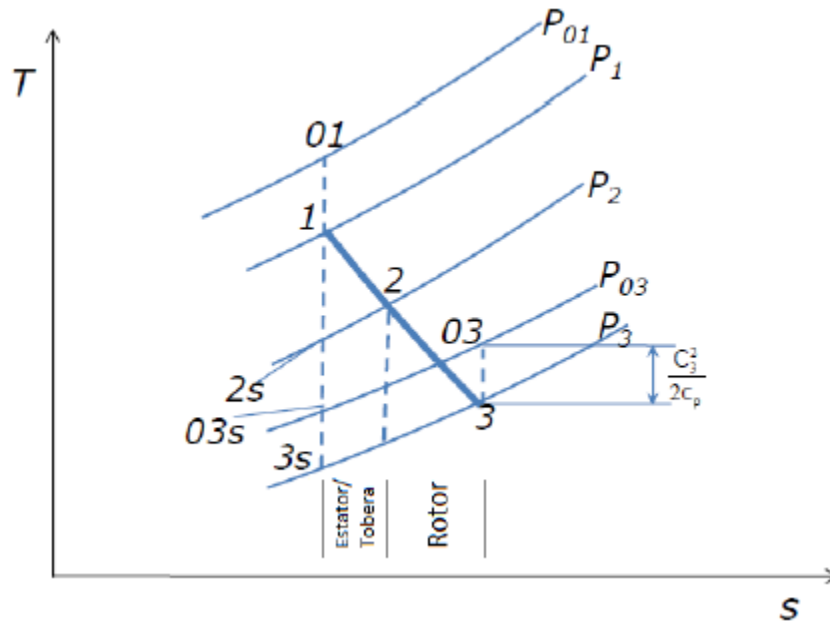
$$\psi = \frac{V_{w2} - V_{w3}}{U} = \frac{2V_{w2}}{U} = \frac{2}{U} (C_{w2} - 1)$$

Para un cambio en las propiedades de un fluido, la eficiencia se define como una relación entre el cambio de la energía y el cambio ideal sin considerar perdidas, lo cual se puede indicar mediante la ecuación

$$\eta = \frac{\text{Cambio real en la energía}}{\text{Cambio ideal en la energía}}$$

Dichos cambios de energía pueden ser expresados en términos de temperaturas las cuales definiremos en un diagrama de temperatura-entropía, en la fig. 13 se muestra el diagrama para el proceso de expansión dentro de una etapa de la turbina.

Figura. 13. Diagrama T-S de la expansión de una etapa de turbina axial.



Martinez Elihu., 2015, *Diseño Teórico de una turbina axial de una etapa mediante conjugación contra rotativa*, México D.F.

Con base al diagrama se puede definir que para una turbina con trabajo ideal y sin energía cinética a la salida, en otras palabras, cumpliendo un proceso isotrópico el trabajo estará dado por:

$$W_{ideal} = C_p(T_{01} - T_{03s})$$

Por lo que se puede definir la eficiencia total estática como:

$$\eta_{ts} = \frac{T_{01} - T_{03}}{T_{01} - T_{03s}} = \frac{T_{01} - T_{03}}{T_{01} \left(1 - \left(\frac{P_{03}}{P_{01}}\right)^{\frac{y-1}{y}}\right)} = \frac{1 - \left(\frac{T_{03}}{T_{01}}\right)}{T_{01} \left(1 - \left(\frac{P_{03}}{P_{01}}\right)^{\frac{y-1}{y}}\right)}$$

## 7. METODOLOGÍA

- 7.1. Recopilar la información:
  - 7.1.1. Iniciar la búsqueda de la información necesaria acerca de las turbinas de vapor, así como también del ciclo Rankine Orgánico.
- 7.2. Definir parámetros de entrada de la turbina recopilando características y especificaciones técnicas de todo el sistema ORC del banco de trabajo del laboratorio de ciencias térmicas.
  - 7.2.1. Conocer información técnica sobre el funcionamiento del banco de trabajo del ciclo Rankine orgánico del laboratorio de ciencias térmicas.
  - 7.2.2. Poner en funcionamiento el equipo térmico (previa autorización de las personas encargadas).
  - 7.2.3. Tomar datos experimentales del Banco de trabajo (Presiones y temperaturas de trabajo, flujo másico del fluido, potencia y geometrías de los componentes del ciclo ORC)
- 7.3. Seleccionar una turbina de vapor que se adecue a los parámetros anteriormente investigados.
  - 7.3.1. Elegir el tipo de turbina que mejor se adecue al equipo ciclo Rankine orgánico montado en el laboratorio de ciencias térmicas.
  - 7.3.2. Realizar memoria de cálculo para determinar las geometrías y datos de funcionamiento de la turbina (Rotor, alabes).
  - 7.3.3. Agregar a la memoria cálculo el dimensionamiento de la tobera.
- 7.4. Modelar en programa CAD la turbina calculada.
  - 7.4.1. Optimizar geoméricamente el modelo en 3D
  - 7.4.2. Seleccionar los materiales adecuados.
  - 7.4.3. Escoger la mejor forma de fabricación y ensamble.
- 7.5. Realizar planos.
  - 7.5.1. Planos de Piezas (Constructivos)
  - 7.5.2. Planos de Ensamble
- 7.6. Evaluar la potencia generada de las dimensiones finales de la turbina para 3 tipos de fluidos orgánicos variando los parámetros de entrada mediante el uso de herramientas de cálculo.
  - 7.6.1. Variar datos característicos del fluido de trabajo en las memorias de cálculo.
  - 7.6.2. Hallar la potencia generada por cada fluido.
- 7.7. Elaboración documento final

## 8. CRONOGRAMA

# ID	Actividad	Semanas																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Recopilación de la información .	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
2	Definir parámetros de entrada mediante un diagnostico al banco actual ORC	■	■	■	■	■	■	■													
3	Seleccionar el tipo de turbina mediante cálculos						■	■	■	■	■	■	■								
4	Optimización mediante Modelamiento CAD											■	■	■	■						
5	Elaboración Planos constructivos													■	■	■	■				
6	Evaluación de potencias utilizando tres fluidos orgánicos															■	■	■	■		
7	Elaboración de documento final												■	■	■	■	■	■	■	■	■

## 9. PRESUPUESTO

Descripción	Cantidad de personas	Dedicación	Valor Hora	Costo total	Fuente y financiación
	Número	Horas	Pesos	Pesos	Descripción
Autores del proyecto	2	120	\$10.000	\$2.400.000	Propia
Director o tutor (interno)	1	16	\$60.000	\$960.000	Universidad Distrital
Papelería	/-/ /-/ /-/ /-	/-/ /-/ /-/ /-	/-/ /-/ /-/ /-	\$50.000	Propia
Transporte	/-/ /-/ /-/ /-	/-/ /-/ /-/ /-	/-/ /-/ /-/ /-	\$50.000	Propia
Internet por banda ancha	/-/ /-/ /-/ /-	/-/ /-/ /-/ /-	/-/ /-/ /-/ /-	\$100.000	Propia
Equipo de cómputo y Software	/-/ /-/ /-/ /-	/-/ /-/ /-/ /-	/-/ /-/ /-/ /-	\$500.000	Propia
<b>Total</b>				\$4.060.000	

## 10. BIBLIOGRAFÍA

La información e investigaciones de este documento fueron consultadas en:

1. KAYMACOR , "HISTORIA DEL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE DE ORC " – pagina institucional KAYMACOR sistemas micro ORC. Disponible en sitio web : <https://www.kaymacor.com/en/Rankine-cycle/>
2. L.Y.BRONICKI , "HISTORY OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS" , articulo cientifico - ORMAT co-founder. Publicado el 2 September 2016 . pag disponible en sitio web : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005101000028>